DOI:10.11931/guihaia.gxzw202305008

贵州兔眼蓝莓不同品种香气成分的测定与特征分析

赵亮清，聂飞，彭歌，文光琴*

（贵州省植物园，贵阳 550004）

摘　要：为研究和明确贵州兔眼蓝莓不同品种的果实香气成分及含量，该研究采用顶空固相微萃取和气相色谱-气质联用（HS-SPME/GC-MS）方法，对贵州主栽兔眼蓝莓‘杰兔’‘灿烂’‘顶峰’‘梯芙蓝’和‘粉蓝’等品种的果实香气组分含量进行检测分析。结果表明：（1）5个品种共检测出 7 大类 46 种香气成分，其中醇类有 8 种、萜类有 13 种、苯环类有 9 个、醛类仅 3 种、酯类 5 种、烷烃类有 4 种、其他类有 4 种。（2）‘顶峰’的香气成分最多，有 33种，‘粉蓝’最少，仅 24 种；各品种香气组分中，醛类占比最大，其次为苯环类，‘灿烂’醛类含量最高（59.32%），‘粉蓝’苯环类含量最高（42.58%）。（3）5 个品种中，‘杰兔’的香气成分总含量最高，为 172 872.20 ng·g^{-1}，其次是‘灿烂’，为 162 200.87 ng·g^{-1}；‘顶峰’和‘粉蓝’的香气成分总含量较低，分别为 91 284.45 ng·g^{-1} 和 97 511.10 ng·g^{-1}。5 个兔眼蓝莓品种在香气成分和含量上表现出显著差异，这些差异为蓝莓品种的优选和深加工原料的选择提供了重要依据。

关键词：贵州，兔眼蓝莓，香气成分，顶空固相微萃取和气相色谱-气质联用法，特征分析

中图分类号：Q946　　　　　　　　　　**文献标识码**：A

Determination and characteristic analysis of aroma components of different varieties of rabbit-eye blueberries in Guizhou

ZHAO Liangqing, NIE Fei, PENG Ge, WEN Guangqin*

(*Botanical Garden of Guizhou Province*, Guiyang 550004, China)

Abstract: To investigate and clarify the aroma components and contents of different varieties of Guizhou rabbit-eye blueberries, this study used headspace solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS) methods to analyze the aroma component content of the main rabbit-eye blueberry grown in Guizhou, such as ‘Coastal’, ‘Britewell’, ‘Climax’, ‘Tifblue’ and ‘Powderblue’. The results were as follows: (1) A total of 46 aroma components in 7 categories were detected in the 5 varieties, including 8 types of alcohols, 13 types of terpens, 9 types of benzenes, 3 types of aldehydes, 5 types of esters, 4 types of alkanes, and 4 types of others. (2) ‘Climax’ has the most aroma components with 33, while ‘Powderblue’ has the least with only 24; among the aroma components of each variety, aldehydes account for the largest proportion, followed by benzenes, with ‘Britewell’ having the highest content of aldehydes (59.32%) and ‘Powderblue’ the highest content of benzenes (42.58%). (3) Among the five varieties, ‘Coastal’ has the highest total content of aroma components, at 172 872.20 ng·g^{-1}, followed by ‘Britewell’ at 162 200.87 ng·g^{-1}; ‘Coastal’ and ‘Powderblue’ have lower total aroma component contents, at 91 284.45 ng·g^{-1}

基金项目：财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系（CARS-29-24）；贵州省科技重大专项（黔科合重大专项字[2015]6013）；贵州省科技计划项目（黔科合支撑[2021]一般 232，黔科合支撑[2020]4Y012 号）。

第一作者：赵亮清（1994-），硕士，助理研究员，主要从事小浆果繁殖及栽培研究等工作，（E-mail）875004614@qq.com。

***通信作者**：文光琴，本科，正高级工程师，主要从事小浆果繁殖及栽培研究等工作，（E-mail）512479941@qq.com。

and 97 511.10 ng·g^{-1}, respectively. The significant differences in aroma components and contents among these five rabbit-eye blueberry varieties provide an important basis for the selection of blueberry varieties and the choice of raw materials.
Keywords: Guizhou, rabbit-eye blueberry, aroma component, headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry, characteristic analysis

蓝莓（*Vaccinium* spp.）又名越橘，为杜鹃花科（Ericaceae）越橘属（*Vaccinium* L.）多年丛生灌木，成熟果实为蓝黑色、浆果（吴文勇，2008）。1983 年蓝莓首次被引入我国吉林省进行种植，随着市场需求的增长和蓝莓产业的迅速发展，蓝莓种植区域得到扩大，主要分布在东北、华南和西南地区，其中贵州省种植面积居全国首位（杨明华等，2022）。与此同时，蓝莓的品种也在不断增加，常见的栽培蓝莓种类主要包括"高丛蓝莓""矮丛蓝莓"以及"兔眼蓝莓"（徐国辉等，2022）。蓝莓果实富含花青苷、类黄酮、氨基酸等物质，具有增强夜间视力、提高记忆力、预防心脑血管疾病、消炎以及抗肿瘤等保健作用（Colak et al., 2016；卜庆雁和周晏起，2010；陈介甫等，2010）。除了具备保健功能外，蓝莓还因其诱人的蓝色果实以及独特的香气和风味而颇受欢迎。

香气成分是评价食品质量的重要指标（张强等，2015），也是决定果实鲜食和加工品质的关键因素。蓝莓具备独特的香气成分主要是由于其成熟过程中合成的醛类、醇类、萜类、酯类等多种挥发性化合物共同作用的结果，不同品种的蓝莓中，这些挥发性化合物的种类和含量各不相同，从而形成了各自独特的香气（陈昌琳等，2022）。蓝莓香气作为影响蓝莓品质的主要因素之一，近年来受到了越来越多学者的关注。刘梦溪等（2023）对'蓝美 1 号''奥尼尔''海岸'3 个高丛蓝莓品种果实的主要风味品质进行了比较，研究发现'奥尼尔'果实中的挥发性成分总含量最高，为 407.08 μg·kg^{-1}，其次为'蓝美 1 号'和'海岸'，分别为 215.89 μg·kg^{-1}、129.66 μg·kg^{-1}，'奥尼尔'果实甜酸比显著高于'蓝美 1 号'，'海岸'果实甜酸比与前两者均无显著性差异。陈昌琳等（2022）采用气质联用仪器测定了四川地区 6 个高丛蓝莓品种的香气成分，结果显示不同品种果实香气成分所含的种类和相对含量均有较大差异，其中共有物质 15 个、特征香气物质 7 个。吴林等（2020）对吉林省'密斯蒂''布里吉塔'2 个品种的蓝莓果皮、果肉和果汁的挥发性香气成分进行了测定，研究揭示了不同蓝莓品种和果实不同部位的独特香气特征。姚依林等（2021）运用 SPME-GC-MS 技术对贵州地区 4 个高丛蓝莓品种的挥发性成分进行了测定和分析，共检测出 77 种挥发性有机物，不同品种中的主要化合物有所不同，展现了各品种的独特香气特征。Forney 等（2022）比较了野生矮丛蓝莓和栽培高丛蓝莓果实的挥发性香气成分。研究发现，这两种蓝莓的香气成分组成存在显著差异，野生矮丛蓝莓主要含有酯类、醛类和单萜类化合物，而栽培高丛蓝莓中则以醛类、单萜类和酯类化合物为主。综上所述，当前对蓝莓果实香气成分的研究主要围绕高丛蓝莓来展开，关于兔眼蓝莓果实香气成分的研究较为缺乏。兔眼蓝莓适应性强、产量高，果实既适宜鲜食更适于加工，不同的加工产品需要选择不同香型品种为原料（文光琴等，2012；杨夫臣等，2015）。兔眼蓝莓主要分布在长江以南的贵州、湖南、安徽等省份，尤其在贵州省黔东南州麻江、凯里、黄平、丹寨等主产区，其产量占全国总量的 30%以上，对国内蓝莓原料市场的影响较大（聂飞和张玉春，2014）。因此对贵州地区不同兔眼蓝莓品种的香气成分进行测定和分析至关重要，可为香型品种的育种工作和产品精深加工提供理论基础。

本研究采集了贵州省麻江县主栽的'杰兔''灿烂''顶峰''梯芙蓝''粉蓝'5 个兔眼蓝莓品种果实，基于顶空固相微萃取和气相色谱−气质联用技术对蓝莓果实香气成分进行了检测和分析，旨在探索其香气物质种类及成分构成，为今后的选育工作和食品加工原料优选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验果实来源于贵州省麻江县龙山镇乌卡坪蓝莓基地，平均海拔 720 m，年均气温 15.2 ℃，年日照时数 1 100 h，年降雨量 1 200 mm，土壤为酸性黄壤（pH 4.5~5.0），蓝莓树龄为 5 年生。分别采摘树体健康、长势一致的兔眼蓝莓‘杰兔’（‘Coastal’）、‘灿烂’（‘Britewell’）、‘顶峰’（‘Climax’）、‘梯芙蓝’（‘Tifblue’）和‘粉蓝’（‘Powderblue’）等品种成熟果实带回实验室，放置于-80 ℃的冰箱备用。每个品种的样品取自健康植株上部东西南北各个方向。

化学试剂：乙醇、氯化钠（分析纯）来源于成都金山化学有限公司，正己烷（色谱纯）、仲辛醇、C7-C40 饱和烷烃混合标准品来源于北京科创欣达科技有限公司。

1.2 分析仪器和设备

气相-质谱联用仪为美国 Agilent 7890B/7000C-GC/MSD；萃取头 50/30 μm、二乙烯苯/碳筛/聚二甲基硅氧烷产自上海安谱实验科技股份有限公司；水浴锅（北京科创欣达科技有限公司）。

1.3 试验方法

1.3.1 香气萃取

参照彭歌等（2021）的方法进行样品处理、萃取以及 GC-MS 检测与数据分析。称取 1 g 液氮研磨的蓝莓果实粉末，将其置于 20 mL 顶空萃取瓶中，瓶中加入 0.1 g NaCl 与 10 μL 内标物质，密封进样。每个品种分别开展 3 个重复的进样。

采用顶空-固相微萃取法测定（Beaulieu et al., 2014；王文治等，2022；郑宗昊等，2022）。先将 50/30 μm 萃取头放于气相色谱仪进样口以 250 ℃老化 5 min，样品置于 40 ℃恒温水浴锅中平衡 20 min，然后将处理好的样品放至萃取头并插入瓶中顶空萃取 30 min，随后将其转移至进样口，于 250 ℃下解吸附 3 min。

1.3.2 GC-MS 检测

GC 条件：色谱柱为 HP-5 ms，柱长、内径和液膜厚度分别为 30 m、250 μm 和 0.25 μm，以氦气为载气，流速 1 mL/min，进样体积 1 μL，分流比 3∶1。

柱温程序：起始温度为 44 ℃保持 2 min，然后以 1 $℃\cdot min^{-1}$ 升至 45 ℃并保留 2 min，再以 0.5 $℃\cdot min^{-1}$ 升至 48 ℃，2 $℃\cdot min^{-1}$ 升至 58 ℃，0.5 $℃\cdot min^{-1}$ 升至 62 ℃，2 $℃\cdot min^{-1}$ 升至 90 ℃，5 $℃\cdot min^{-1}$ 升温到 130 ℃，最后以 15 $℃\cdot min^{-1}$ 升温到 250 ℃。保留 5 min 后，以 210 ℃运行 1 min 结束。

MS 条件：电离方式采用 EI 模式，电子能量为 70 eV；离子源温度 230 ℃，进样口温度为 250 ℃，转移线温度为 280 ℃，检测范围为 45~600 *m*/*z*。

1.3.3 香气物质数据的定性和定量分析

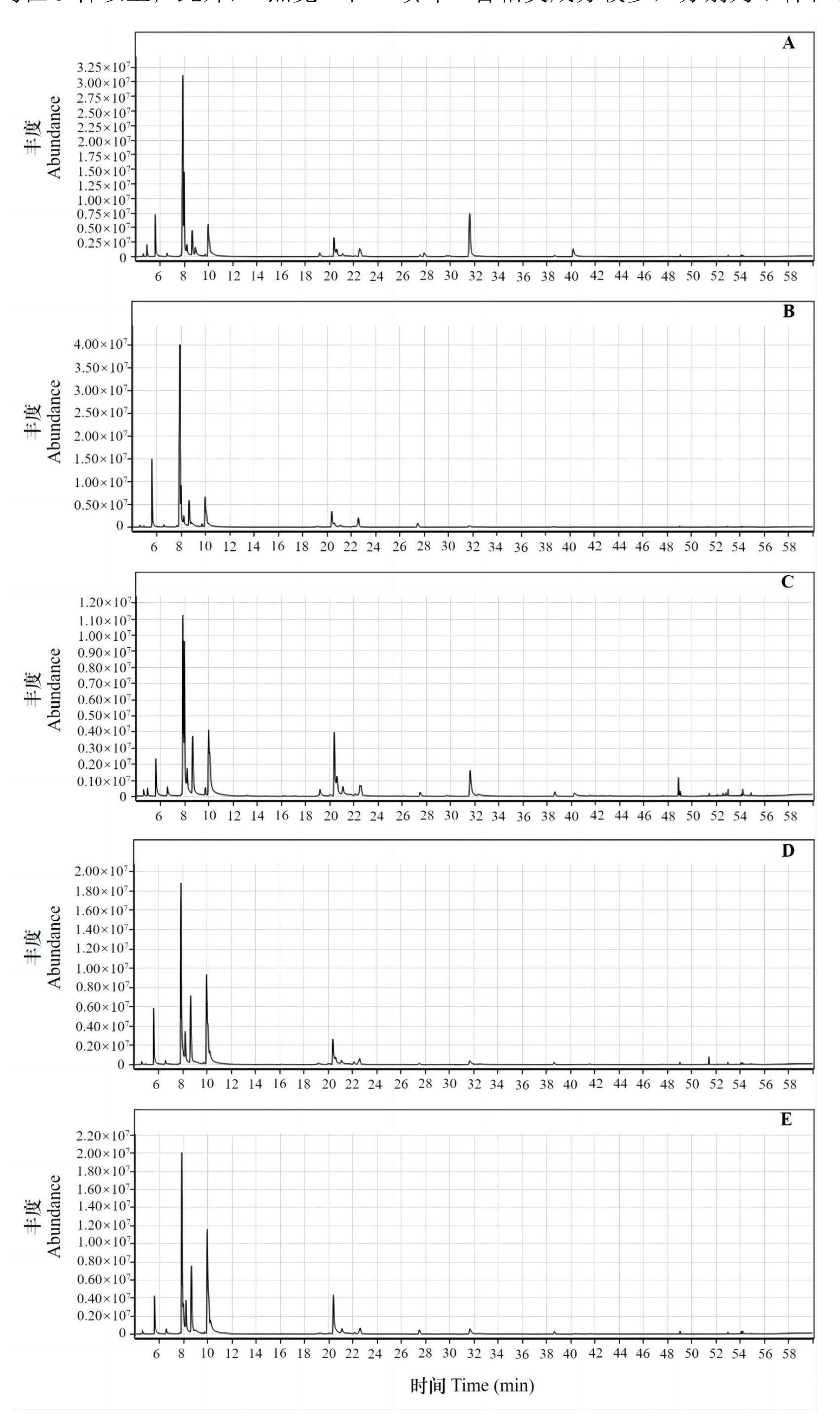
利用 Agilent Qualitative Analysis B.07.00 分析软件，同时将 NIST 14 谱库中标准化合物的质谱图作为对照，参考相关文献中保留指数进行定性分析，得到质谱图。又利用峰面积归一化法进行定量分析，即各组分峰的峰面积占所有峰总面积的比例，并且以仲辛醇为内标物计算释放量。使用 Excel 2019 软件对数据进行统计分析和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 兔眼蓝莓 5 个品种的香气成分及种类情况

如图 1 所示，利用热脱附-GCMSD 对 5 个不同兔眼蓝莓品种进行分析，得到各品种的总离子流对比图。由表 1 可知，5 个兔眼蓝莓品种共检测出香气成分 7 大类共 46 种，包括醇类物质 8 种、醛类物质 3 种、酯类物质 5 种、烷烃类物质 4 种、萜类物质 13 种、苯环类物质 9 种、其他类物质有 4 种。从各品种来看，早中熟品种‘顶峰’的香气成分最多，含有 33 种，包括醇类 4 种、醛类 3 种、脂类 3 种、烷烃类 3 种、萜类 9 种、苯环类 7 种、其他类 4 种；晚熟品种‘粉蓝’的香气成分最少，含有 24 种，包括醇类 5 种、醛类 2 种、脂类 3 种、烷烃类 3 种、萜类 3 种、苯环类 7 种、其他 1 种。5 个品种检测出的香气成分中，苯环类的成分相

对较多，均在 5 种以上；此外，‘杰兔’和‘顶峰’含萜类成分较多，分别为 7 种和 9 种。



A.‘杰兔’；B.‘灿烂’；C.‘顶峰’；D.‘梯芙蓝’；E.‘粉蓝’。

A. ‘Coastal’；B. ‘Britewell’；C. ‘Climax’；D. ‘Tifblue’；E. ‘Powderblue’.

图 1　兔眼蓝莓香气成分总离子流图

Fig.1　Total ionic chromatogram of aroma components in the fruit of rabbit-eye blueberry

表 1　贵州 5 个兔眼蓝莓品种香气成分含量表

Tab 1　List of aroma components content of 5 Rabbit-eye blueberry varieties in Guizhou

$ng \cdot g^{-1}$

化合物类别 Categorie	化合物名称 Compounds name	CAS 码 CAS number	兔眼蓝莓 Rabbit-eye blueberry				
			‘杰兔’ ‘Coastal’	‘灿烂’ ‘Britewell’	‘顶峰’ ‘Climax’	‘梯芙蓝’ ‘Tifblue’	‘粉蓝’ ‘Powderblue’
醇类 Alcohols	3-辛醇 3-Octanol	589-98-0	108.41	150.52	76.27	226.93	175.64
	1-壬醇 1-Nonanol	143-08-8	—	867.21	—	—	—
	反式-对-薄荷-2,8-二烯醇 *trans*-*p*-Mentha-2,8-dien-1-ol	52154-82-2	—	4 414.79	855.32	—	—
	芳樟醇 Linalool	78-70-6	21 563.41	2 121.17	5 155.04	2 490.96	1 927.05
	桉叶油醇 Eucalyptol	470-82-6	—	6 303.89	1 580.57	2 100.43	1 910.72
	顺-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇 *cis*-alpha,alpha,5-trimethyl-5-vinyltetrahydrofuran-2-methanol	5989-33-3	1 809.47	—	—	—	—
	顺式-对-薄荷-2,8-二烯-1-醇 *cis*-*p*-Mentha-2,8-dien-1-ol	3886-78-0	—	—	—	745.86	1 139.98
	双环[2.2.1]庚烷-2,5-二醇，1,7,7-三甲基 Bicyclo[2.2.1]heptane-2,5-diol, 1,7,7-trimethyl	10359-41-8	—	—	—	—	199.88
醛类 Aldehydes	反式-2-己烯醛 *trans*-2-Hexenal	6728-26-3	55 707.7	76 930.37	26 148.39	43 608.15	36 875.62

	己醛 Hexanal	66-25-1	8 857.36	19 279.79	5 523.84	12 145.28	7 278.6
	2-异丙基-5-甲基己-4-烯醛 2-Isopropylidene-5-methylhex-4-enal	3304-28-7	200.97	—	53.56	112.77	—
酯类 Esters	异戊酸甲酯 Methyl isovalerate	556-24-1	2 170.49	399.7	764.05	285.38	108
	丁酸，3-甲基 - 乙酯 Butanoic acid, 3-methyl-, ethyl ester	108-64-5	27 310.04	10 585.69	14 950.79	6 704.05	4 864.74
	2 -（1R，4R）-4-羟基-4-甲基环己-2-烯基）丙-2-炔酸乙酯 2- (1R, 4R) -4-hydroxy-4-methylcyclohex-2-enyl) propane-2-alkyne ethyl ester	121958-61-0	908.19	—	—	—	—
	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate	6846-50-0	—	—	326.75	223.68	227.82
	戊酸，2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基，异丁基酯 Valproic acid, 2,2,4-trimethyl-3-carboxylisopropyl, isobutyl ester	—	257.87	185.48	—	—	—
烷烃类 Alkanes	邻伞花烃 o-Cymene	527-84-4	374.45	267.25	362.79	444.81	316.06
	十二烷 Dodecane	112-40-3	255.81	239.67	263.38	137.19	112.28
	十三烷 Tridecane	629-50-5	176.07	141.82	170.27	113.93	106.22
	十四烷 Tetradecane	629-59-4	98.55	—	—	62.34	—
萜类 Terpens	β-榄香烯, [1S-（1α，2β，4β）] β-Elemene, [1S-（1α，2β，4β）]	515-13-9	—	—	126.08	—	—

1,5,5-三甲基-6-亚甲基环己烯 1,5,5-Trimethyl-6-methylene-cyclohexene	514-95-4	—	—	122.26	65.57	—
3-蒈烯 3-Carene	13466-78-9	114.71	—	127.02	121.59	92.43
萜品油烯 Terpinolene	586-62-9	523.4	155.27	209.76	56.81	—
3-对-薄荷烯-7-al 3-*p*-Menthen-7-al	27841-22-1	81.77	—	—	77.94	—
右旋柠檬烯 D-Limonene	5989-27-5	5 868.87	—	1 073.09	—	—
α-萜品醇 α-Terpineol	98-55-5	6 374.54	261.34	778.6	94.31	299.36
6-异丙烯基-3-甲氧基甲氧基-3-甲基-环己烯 6-Isopropenyl-3-methoxymethoxy-3-methylcyclohexene		—	117.3	—	—	—
β-愈创木烯 β-Guaiene	88-84-6	—	—	117.7	—	—
石竹烯 Caryophyllene	87-44-5	285.14	—	—	191.23	—
氧化石竹烯 Caryophyllene oxide	1139-30-6	309.94	128.13	—	—	153.76
环己烯，4-乙烯基-4-甲基-3-（1-甲基乙烯基）-1-（1-甲基乙基）-，（3R-反式） Cyclohexene, 4-vinyl-4-methyl-3- (1-methylvinyl) -1-(1-methylethyl) -, (3R *trans*)-	20307-84-0	—	—	1 556.18	—	—
环己烯，6-乙烯基-6-甲基-1-（1-甲基乙基）-3-（1-甲基亚乙基）-（S）	5951-67-7	—	—	83.31	—	—

	Cyclohexene, 6-vinyl-6-methyl-1- (1-methylethyl) -3- (1-methylethylidene) - (S)						
苯环类 Benzenes	甲苯 Toluene	108-88-3	782.13	763.31	751.39	503.59	479.86
	苯乙烯 Styrene	100-42-5	20 651.74	19 936.32	14 344.62	24 109.65	24 678.97
	乙苯 Ethylbenzene	100-41-4	3 430.1	3 196.74	2 974.49	—	4 115.05
	对二甲苯 *p*-Xylene	106-42-3	10 771.07	10 678.74	8 604.4	11 195.7	11 984.17
	1-乙基-3-甲基苯 Benzene, 1-ethyl-3-methyl	620-14-4	92.6	—	99.25	—	—
	苯，1,2,4-三甲基 Benzene, 1,2,4-trimethyl	95-63-6	48.62	103.21	40.6	62.78	109.73
	苯，(1-甲基乙基) Benzene, (1-methylethyl)	98-82-8	—	—	—	67.6	55.36
	苯，丙基 Benzene, propyl	103-65-1	—	—	—	90.85	91.51
	萘，1,2,4a，5,8,8a-六氢-4,7-二甲基-1-（1-甲基乙基）（1α，4aβ，8aα） Naphthalene, 1,2,4a, 5,8,8a-Hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl) (1α，4aβ，8aα)	5951-61-1	—	—	171.98	4 705.51	—
	正丁醚 *n*-Butyl ether	142-96-1	494.92	1 096.28	935.37	196.32	208.29
其他类 Others	（2R，5R）-2-甲基-5-（丙-1-烯-2-基）-2-乙烯基四氢呋喃 (2R,5R)-2-Methyl-5-(prop-1-en-2-yl)-2-vinyltetrahydrofuran	54750-70-8	1 274.04	1 347.59	837.05	523.14	—

（2R，5S）-2-甲基-5-（丙-1-烯-2-基）-2-乙烯基四氢呋喃 (2R,5S)-2-Methyl-5-(prop-1-en-2-yl)-2-vinyltetrahydrofuran	54750-69-5	1 969.8	2 399.28	1 984.62	—	—
2H-吡喃，2-乙烯基四氢-2,6,6-三甲基 – 2H-Pyran, 2-ethenyltetrahydro-2,6,6-trimethyl	7392-19-0	—	130.02	115.66	—	—
总含量 Total content		172 872.2	162 200.87	91 284.45	111 464.35	97 511.1

注：—表示含量 < 0.01%或未检测出。

Notes：— show trace amount 0.01% or not detecte.

2.2 5 个兔眼蓝莓的物候期及香气成分含量情况

由表 2 可知，‘杰兔’和‘灿烂’的果实成熟期较为一致且较早，为早熟品种，‘粉蓝’果实成熟期较晚，为晚熟品种，而‘顶峰’和‘梯芙蓝’则在两者之间。从香气物质总含量来看，早熟品种‘杰兔’果实香气成分总含量最大，为 172 872.20 ng·g^{-1}，其次是‘灿烂’，为 162 200.87 ng·g^{-1}，‘顶峰’和‘粉蓝’的香气物质总含量较低，分别为 91 284.45 ng·g^{-1} 和 97 511.10 ng·g^{-1}。

同一水果不同品种的口感风味差异受果实中所含香气成分和含量的不同所影响，香气成分和含量的差异能反映出品种的风味特点（路翔等，2022；魏鑫等，2022）。表 1 中，‘灿烂’是 5 个兔眼蓝莓中唯一含有“1-壬醇（CAS 码：143-08-8）”成分的品种且香气物质总含量也较高，其在风味上也具有淡淡的玫瑰和橙的香气。因此，‘灿烂’既用于鲜食品种又用于加工品种，深受消费者欢迎。

表 2　5 个兔眼蓝莓物候期及香气物质总含量情况

Tab 2　Phenology and total content of aroma substances of 5 rabbit-eye blueberry

兔眼蓝莓品种 Rabbit-eye blueberry	开花授粉期 Flowering and pollination stage (day/month)	果实膨大期 Fruit expansion stage (day/month)	果实成熟期 Fruit maturity stage (day/month)	香气物质总含量 Total content of aroma substances (ng·g^{-1})
‘杰兔’ ‘Coastal’	15/3—15/4	20/4—10/6	15/6—10/7	172 872.20
‘灿烂’ ‘Britewell’	15/3—15/4	20/4—10/6	20/6—15/7	162 200.87
‘顶峰’ ‘Climax’	20/3—20/4	25/4—10/6	25/6—20/7	91 284.45
‘梯芙蓝’ ‘Tifblue’	20/3—20/4	25/4—10/6	25/6—20/7	111 464.35
‘粉蓝’ ‘Powderblue’	25/3—25/4	1/5—20/6	15/7—15/8	97 511.10

2.3 5 个兔眼蓝莓品种果实所含香气成分的特征分析

由图 2 可知，兔眼蓝莓品种中醛类和苯环类两大成分的量最大，醛类含量在 34.76%~59.32%之间，苯环类含量在 20.70%~42.58%之间，而烷烃类的含量相对较低，仅在 0.40%~1.01%之间，表明了醛类和苯环类是兔眼蓝莓的主要的香气组分。

此外，在醛类香气成分中，虽然‘灿烂’仅含反式-2-己烯醛和己醛两种醛类成分，但是其所占醛类总含量最高，达到 59.32%，‘顶峰’最低，仅为 34.76%，这两种醛类的存在使蓝莓具有浓浓的绿叶清香和水果香气，同时也增加了油脂香和果香（王健美等，2008；Farneti et al., 2017）；在苯环类中，晚熟品种‘粉蓝’的含量高达 41 514.65 ng·g^{-1}，占苯环类总含量 42.58%，而苯环是众多带有强烈芳香化合物气味的基础结构，使果实带有香甜的气息味。

在 5 个品种中共检测出 8 种醇类香气物质，每个品种仅含有 3~5 种成分，3-辛醇和芳樟醇是 5 个品种共有的，除‘杰兔’外，其他 4 个品种均含有桉叶油醇，桉叶油醇有樟脑气息和清凉的草药味道；芳樟醇具有浓青带甜的木青气息，似玫瑰木香气又具有果香气息（王健美等，2008）。

酯类物质在 5 个兔眼蓝莓品种中的含量也不低，尤其是在‘杰兔’和‘灿烂’中含量高达 17%以上，是主体香气成分；5 个品种均含异戊酸甲酯和丁酸-3-甲基-乙酯，含丁酸-3-甲基-乙酯的量最高，在 4 864.74~27 310.04 ng·g^{-1} 之间，该物质具有类似苹果的水果香气，而异戊

酸甲酯则具有药草和水果香气。

5 个兔眼蓝莓品种共检测出 13 种萜类物质，‘杰兔’的萜类物质相对含量最高，为 7.84%，‘顶峰’含 4.46%，其余 3 个品种的含量在 0.4%~0.56%之间。其中α-萜品醇为主体萜类物质，在 5 个品种中均含有。

苯环类物质共检测出 9 种成分，每个品种均含有 5~7 种，其中以苯乙烯和对二甲苯的含量最高且苯环类是 5 个兔眼蓝莓品种的主要香气物质之一，各品种所占总量比均超过 20%。

所检测出的 46 种香气成分在 5 个兔眼蓝莓品种中均含有的仅有 14 种，5 个品种分别唯一含有的成分也是 14 种。这表明了贵州兔眼蓝莓不同品种果实香气的差异性较大。

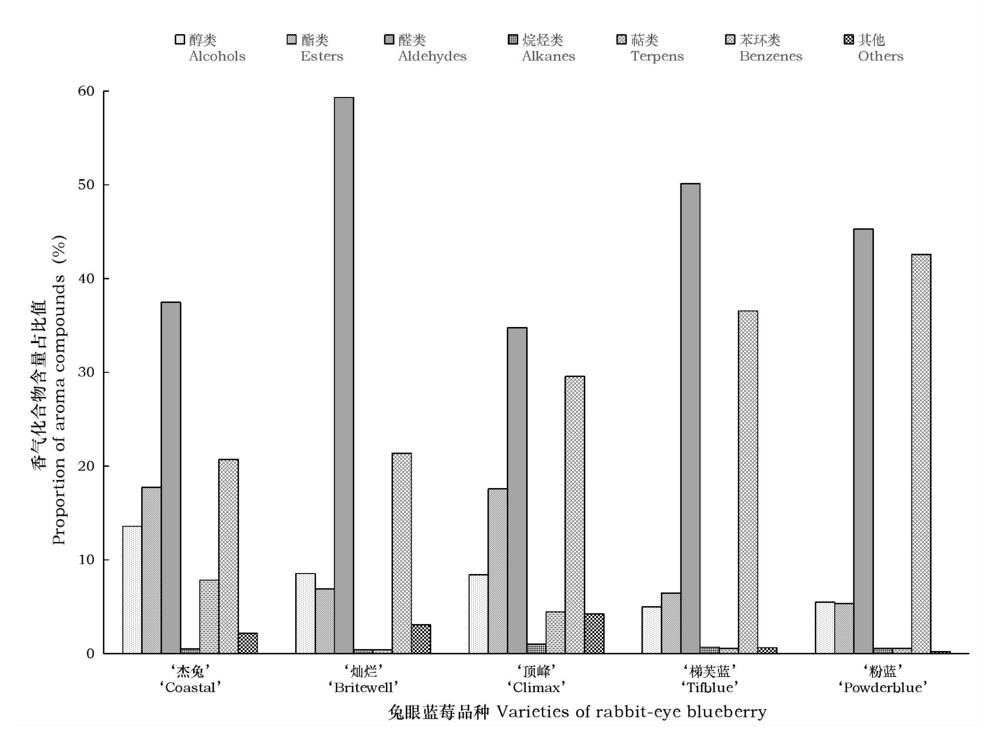


图 2　兔眼蓝莓不同品种主要香气成分占总含量比例情况

Fig.2　The proportion of main aroma components in total content of different varieties of rabbit-eye blueberry

3 讨论与结论

本研究采用顶空固相微萃取和气相色谱-气质联用方法，对贵州主产区的 5 个兔眼蓝莓品种果实的香气成分和种类进行了测定和分析。共检出香气成分有 7 大类 46 种，分别为醇类、醛类、酯类、烷烃类、萜类、苯环类和其他类。‘杰兔’‘灿烂’‘顶峰’‘梯芙蓝’和‘粉蓝’品种分别检测出 30、26、33、29、24 种香气成分，化合物总含量分别为 172 872.2、162 200.87、91 284.45、111 464.35、97 511.1 $ng \cdot g^{-1}$，说明不同兔眼蓝莓品种之间所含香气成分大类基本一致但所含成分的种类和总含量差异较大。由于当前针对兔眼蓝莓不同品种香气成分测定的文献未见报道，因此我们将本研究测定的结果与已发表的高丛蓝莓果实香气成分相关文献进行对比讨论，以更清晰的了解兔眼蓝莓果实与高丛蓝莓果实的异同之处。为了减少因地域不同而造成蓝莓生长环境差异导致果实特性差异的影响（文光琴等，2023），我们将本研究结果与团队先前对贵州地区高丛蓝莓的研究成果进行对比，探讨兔眼蓝莓与高丛蓝莓果实香气成分的异同之处。彭歌等（2021）对贵州省麻江县龙山镇龙奔基地的 5 个高丛蓝莓品种果实的香气成分进行了测定，结果显示‘奥尼尔’‘密斯蒂’‘都克’‘夏普蓝’和‘蓝雨’的香气化合

物种类为醇类、酯类、醛类、萜类、苯环类和其他，香气成分分别有 33、35、37、30、32 种，化合物总含量分别为 167 321.90、130 271.06、68 344.42、61 568.02、25 973.22 $ng·g^{-1}$；这与本研究中的兔眼蓝莓的香气化合物种类基本一致，但本研究所检测的 5 个兔眼蓝莓品种的香气成分总体上少于该研究中检测的 5 个高丛蓝莓品种，尤其是‘粉蓝’品种的香气成分仅为 24 种，而‘都克’品种的香气成分达到 37 种。高丛蓝莓和兔眼蓝莓的香气种类有着同一性但成分却又有差异性。本研究与彭歌等（2021）研究对比，在基本除去环境生长因素的影响下，推测这可能是由于遗传因素而导致的。蓝莓不同品种间的遗传差异是影响香气成分多样性的主要因素。每个品种的遗传背景决定了其特有的代谢途径，进而影响特定香气成分的合成。例如，‘顶峰’品种香气成分最多，可能是由于其特有的遗传变异促进了更多香气成分的生物合成。此外，值得注意的是，5 个高丛蓝莓除‘奥尼尔’‘密斯蒂’品种的化合物总含量相对较高外，其他品种的化合物总含量均低于兔眼蓝莓。不同品种的挥发性香气组分含量的差异，是决定各品种风味特点的关键因素（孙阳，2008；胡秋丽等，2017）。通过比较可以看出，高从蓝莓的香气成分种类比兔眼蓝莓更为丰富，这表明高丛蓝莓可能拥有更独特的风味，因此更适宜作为鲜食。而兔眼蓝莓虽然香气成分种类较少，但其化合物的总含量却高于高丛蓝莓，这一特点使得兔眼蓝莓在加工过程中更能保持风味的稳定性，从而在加工领域显示出其优势。本研究结果通过选择和培育具有优良香气特性的品种，可以提高蓝莓的市场竞争力和消费者满意度。

本研究结果强调了在蓝莓育种和加工中考虑香气成分的重要性，为进一步探讨蓝莓主要香气成分的酶促形成机理与条件、特色香型品种的创制和培育，以及蓝莓果汁、果醋和果酒等精深加工产品的研发提供了重要的理论基础。同时，这些发现也为蓝莓的栽培、育种和深加工过程中不同风味的搭配提供了关键信息。然而，需要注意的是，果实的香气成分受环境、代谢、遗传和一系列酶促反应的影响（黎源和董涛，2013）。本次研究中所分析的兔眼蓝莓品种较少，且检测指标单一，因此未能充分反映出规律性。未来，课题组计划结合更多指标进行全面分析，并从遗传因素、环境因素以及蓝莓的成熟度和采后处理方式等方面充分考虑，以开展更深入的研究。

参考文献：

BEAULIEU J C, STEIN-CHISHOLM R E, BOYKIN D L., 2014. Qualitative analysis of volatiles in rabbiteye blueberry cultivars at various maturities using rapid solid-phase microextraction[J]. J Am Soc Hortic Sci, 139(2): 167-177.

BU QY, ZHOU YQ, 2010. Analysis of the nutritional health function and development and utilization prospect of blueberry[J]. N Hortic, 34(8): 215-217. [卜庆雁，周晏起，2010. 浅析蓝莓的营养保健功能及开发利用前景[J]. 北方园艺，34（8）：215-217.]

CHEN CL, SUN XQ, ZHONG CC, et al., 2022. Quality evaluation and aroma components analysis of different blueberry cultivars in Sichuan[J]. Food Ferment Indust, 48(19): 264-271. [陈昌琳，孙小钦，钟程操，等，2022. 四川地区不同蓝莓品种的品质评价及香气成分分析[J]. 食品与发酵工业，48（19）：264-271.]

CHEN JF, LI YD, XU Z, 2010. Chemical principles and bioactivities of blueberry[J]. Acta Pharm Sin, 45(4): 422-429. [陈介甫，李亚东，徐哲，2010. 蓝莓的主要化学成分及生物活性[J]. 药学学报，45（4）：422-429.]

COLAK, N., TORUN, H., GRUZ, J., et al., 2016. Bog bilberry phenolics, antioxidant capacity and nutrient profile[J]. Food Chem, 201(Jun.15): 339-349.

FARNETI B, KHOMENKO I, GRISENTI M, et al., 2017. Exploring blueberry aroma complexity by chromatographic and direct-injection spectrometric techniques[J]. Front Plant Sci, 8: 617.

FORNEY CF, QIU S, JORDAN MA, et al., 2022. Comparison of volatile compounds contributing to flavor of wild lowbush (*Vaccinium augustifolium*) and cultivated highbush (*Vaccinium corymbosum*) blueberry fruit using gas chromatography-olfactometry[J]. Foods, 11(16): 2516-2541.

HU QL, XIN XL, SUN HY, et al., 2017. Research progresses on blueberry of phytochemical constituents[J]. Spec Wild Econ Anim Plant Res, 39(1): 52-63. [胡秋丽，辛秀兰，孙海悦，等，2017. 蓝莓植物化学成分研究进展[J]. 特产研究，39（1）：52-63.]

LI Y, DONG T, 2013. Advances on study of fruit aromatic substances[J]. J South Chin Univ Trop Agric, 4(3): 266-275. [黎源，董涛，2013. 果实香气物质的研究进展[J]. 热带生物学报，4（3）：266-275.]

LIU MX, LIN SY, ZENG QL, et al., 2023. Analysis on main flavor quality of 3 *Vaccinium corymbosum* fruits[J]. China Fruits, 233(3): 54-59. [刘梦溪，林绍艳，曾其龙，等，2023. 3 个南高丛蓝莓品种果实主要风味品质比较[J]. 中国果树，233（3）：54-59.]

LU X, GAO Y, WANG K, et al., 2022. Analysis of aroma characteristics in different cultivated apple strains[J]. Sci Agric Sin, 55(3): 543-557. [路翔，高源，王昆，等，2022. 苹果栽培品种不同族系香气特征分析[J]. 中国农业科学，55（3）：543-557.]

NIE F, ZHANG YC, 2014. Opportunities and challenges for development of blueberry industry in China[J]. N Hortic, 38(4): 165-170. [聂飞，张玉春，2014. 我国蓝莓产业发展的机遇与挑战[J]. 北方园艺，38（4）：165-170.]

PENG G, LI B, NIE F, et al., 2021. Detection and analysis of aroma components of 5 high-bush blueberry cultivars in Guizhou[J]. J SW For Univ(Nat Sci, 41(1): 94-99. [彭歌，李冰，聂飞，等，2021. 贵州 5 个高丛蓝莓栽培品种香气成分的检测与分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学)，41（1）：94-99.]

SUN Y, 2008. Studies on fruit volatile compounds and micropropagation technics of blueberry (*Vaccinium*)[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University: 1-63. [孙阳，2008. 蓝莓果实香气成分及微体快繁技术的研究[D]. 泰安：山东农业大学：1-63.]

WANG J,M, FENG L, JI HW, et al., 2008. Analysis of chemical constituents of the essential oil from duke blueberry fruits by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Fine Chem, 25(6): 580-582. [王健美，冯蕾，冀海伟，等，2008. 气相色谱-质谱法分析杜克蓝莓果实挥发油的化学成分[J]. 精细化工，25（6）：580-582.]

WANG WZ, CHEN L, MI YH, et al., 2022. Characterization on aroma components of 3 kinds of table grapes based on headspace soild phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. J Food Saf Qual, 13(24): 8075-8082. [王文治，陈璐，米艳华，等，2022. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法鉴别 3 种葡萄香气特征成分[J]. 食品安全质量检测学报，13（24）：8075-8082.]

WEI X, GUO D, WANG HG, et al., 2022. Fruit quality and aroma substances of different blueberry cultivars[J]. Food Res Dev, 43(6): 149-156. [魏鑫，郭丹，王宏光，等，2022. 不同品种蓝莓果实品质和香气物质差异分析[J]. 食品研究与开发，43（6）：149-156.]

WEN G,Q, NIE F, FANG PW, 2012. The expression characters and its application evaluation of *Vaccinium ashei* in Guizhou Province[J]. N Hortic, 36(13): 27-30. [文光琴，聂飞，方品武，2012. 兔眼蓝莓在贵州的表现性状及应用评价[J]. 北方园艺，36（13）：27-30.]

WEN GQ, ZHAO LQ, ZHOU Y, et al., 2023. The growth status of six varieties of highbush blueberries in different elevation areas in Guizhou Province[J]. S China Fruits, 52(4): 145-150. [文光琴，赵亮清，周荧，等，2023. 6 个高丛蓝莓在贵州不同海拔生态区的生长及果实特

性差异[J]. 中国南方果树，52（4）：145-150.]
WU L, ZHANG Q, ZANG HM, et al., 2020. Evaluation of volatile aroma components in blueberry peel, pulp and juice by odor activity value[J]. Sci Technol Food Ind, 41(1): 195-200. [吴林，张强，臧慧明，等，2020. 气味活度值法评价蓝莓果皮、果肉、果汁挥发性香气成分[J]. 食品工业科技，41（1）：195-200.]
WU WY, 2008. Biological characteristics and cultivation techniques of blueberries[J]. S China Fruits, 37(2): 50-51. [吴文勇，2008. 蓝莓的生物学特性及栽培技术[J]. 中国南方果树，37（2）：50-51.]
XU GH, HUANG ZY, LI YF, et al., 2022. Analysis of the characteristics and breeding trends of global blueberry new varieties in 2020[J]. S China Fruits, 51(5): 207-213. [徐国辉，黄子莹，李逸斐，等，2022. 2020 年全球蓝莓新品种特征及其育种趋势分析[J]. 中国南方果树，51（5）：207-213.]
YANG FC, QIN ZQ, LI XM, et al., 2015. Introduction experiment of highbush blueberry and rabbit eye blueberry in Hubei[J]. S China Fruits, 44(1): 59-62. [杨夫臣，秦仲麒，李先明，等，2015. 高丛蓝莓和兔眼蓝莓在湖北的引种试验[J]. 中国南方果树，44（1）：59-62.]
YANG MH, XIE DH, ZHANG X, et al., 2022. Analysis of major quality characteristics and volatile components of blueberry honey[J]. Sci Technol Food Ind, 43(14): 336-344. [杨明华，解道豪，张昕，等，2022. 蓝莓蜜主要品质特性及挥发性成分分析[J]. 食品工业科技， 43（14）：336-344.]
YAO YL, ZHOU Y, DUAN RY, et al., 2021. Determination and analysis of volatile components of mountain blueberry in Guizhou[J]. Mol Plant Breed, 19(24): 8305-8314. [姚依林，周荧，段如雁，等，2021. 贵州山地蓝莓挥发性成分测定与分析[J]. 分子植物育种，19（24）：8305-8314.]
ZHANG Q, XIN XL, YANG FM, et al., 2015. Evaluation of the relative odor activity value in red raspberry fruit vinegar by principal component analysis[J]. Mod Food Sci Technol, 31(11): 332-338. [张强，辛秀兰，杨富民，等，2015. 主成分分析法评价红树莓果醋的相对气味活度值[J]. 现代食品科技，31（11）：332-338.]
ZHENG ZH, ZHANG XZ, FU FH, et al., 2022. Study on aroma components of *Canarium album* of different cultivars based on HS-SPME-GC-MS[J]. Sci Technol Food Ind, 43(23): 282-290. [郑宗昊，张向争，傅芳浩，等，2022. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术的不同品种（系）橄榄香气成分研究[J]. 食品工业科技，43（23）：282-290.]